

03;05;12

Электретно-термический и диэлектрический анализ структуры электрически активных коллоидных систем

© Л.А. Щербаченко,¹ В.С. Борисов,¹ Н.Т. Максимова,¹ Е.С. Барышников,²
Я.В. Ежова,¹ В.А. Карнаков,¹ С.Д. Марчук,¹ Ю.Т. Эйне¹

¹ Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия

² Иркутский онкологический центр,
664035 Иркутск, Россия
e-mail: frenzy_phoenix@mail.ru

(Поступило в Редакцию 25 августа 2009 г. В окончательной редакции 8 декабря 2009 г.)

Проведено исследование природы и механизма межфазного электрического взаимодействия в коллоидных органических системах, содержащих активную твердую и полярную жидкую фазы. Обнаружены особые свойства таких систем. На границах раздела жидкой и твердой компонент зарегистрировано появление значительных электрических сил, приводящих к возникновению градиентов потенциала собственного внутреннего электрического поля. Последнее, при наличии свободных зарядов и каналов ионной проводимости, способно обеспечивать существование токов в таких системах. При исследовании коллоидной системы венозной крови человека установлено, что внутреннее поле способствует образованию мезоскопической неоднородности структуры водной компоненты плазмы и цитоплазмы. Показано, что концентрация молекул свободной воды в жидкой фазе исследуемой системы является максимальной для крови I группы, а физически неоднородные свойства связанной воды проявляются в наибольшей степени для крови IV группы. Этот факт находит подтверждение в наблюдаемой дисперсии диэлектрической поляризации исследуемой системы для крови различных групп.

Введение

Значительное внимание, уделяющееся изучению поляризационных процессов в конденсированных средах, оставляет актуальным вопрос об исследовании дисперсных электрически активных систем, в которых низкоразмерная твердая компонента с активной поверхностью погружена в полярную жидкую матрицу [1–4]. В таких сложных системах на межфазных границах раздела твердой и жидкой компонент возникает электрическое взаимодействие полярных молекул жидкости и зарядов на поверхности твердой фазы. Это взаимодействие приводит к возникновению градиентов потенциала собственного внутреннего поляризованного состояния системы [5–7].

С физической точки зрения кровь человека является конденсированной средой, состоящей из полярной жидкой матрицы (плазмы и цитоплазмы) и взвешенных в ней коллоидных элементов: как электрически активных (клеточные мембраны), так и нейтральных (белки, аминокислоты). В связи с тем что твердые электрически активные коллоидные элементы имеют размеры порядка нескольких микрон и характеризуются высокой концентрацией, суммарная площадь контакта заряженной поверхности этих элементов и полярной жидкой фазы достигает значительной величины. Величина удельной поверхности электрически активной конденсированной системы (ЭАКС) определяет эффективность электроконтактного взаимодействия ее компонент [1,8,9]. Такое электрическое взаимодействие формирует собственное внутреннее поле и градиенты биопотенциала поляризо-

ванного состояния крови человека, которые определяют характерные свойства, присущие только рассматриваемым электроактивным системам.

Целью настоящей работы являлось изучение природы возникновения и механизма межфазного взаимодействия в электрически активных коллоидных системах на примере исследования венозной крови человека.

Методика

Объектом исследования являлась венозная кровь человека различных групп. Изучаемые образцы помещались в специально сконструированную ячейку, представляющую собой плоский конденсатор объемом $0.12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ с двумя алюминиевыми электродами, обработанными этиловым спиртом. Один из электродов дополнительно покрывался тонкой фторопластовой пленкой с высоким омическим сопротивлением. Интервал времени между взятием пробы крови и началом измерений не превышал 15 min.

Термостимулированные токи (ТСТ) в интервале температур от 20 до 220°C регистрировались с помощью высокоточного цифрового вольтметра-электрометра В7-49 с погрешностью измерения тока 10^{-15} A при линейном нагреве образца со скоростью, не превышающей 1 K/min, и при отсутствии внешнего напряжения на электродах измерительной ячейки [7]. Низкая скорость нагрева обеспечивала отсутствие градиентов температуры в образце, что являлось необходимым условием получения информативных и достоверных тер-

мостимулированных токовых спектров. В связи с тем что на электродах измерительной ячейки отсутствовало внешнее напряжение, динамика наблюдаемых спектров ТСТ зависела только от распределения собственных внутренних электрических полей, создаваемых локализованными носителями термоэлектретного заряда исследуемой системы. Полученные данные записывались в память ЭВМ и представлялись в виде временных диаграмм термостимулированных токов и температуры образца. Проводился постоянный контроль стабильности начальной емкости для образцов крови каждой группы. Диэлектрический анализ изучаемой коллоидной системы осуществлялся емкостным методом с использованием измерителя импеданса Е7-20 в частотном диапазоне от 25 до 10⁶ Hz. При этом амплитуда внешнего напряжения на электродах измерительной ячейки составляла минимально возможное значение 0.04 V, что позволило исключить влияние внешнего поля на физико-химические процессы в крови человека.

Результаты и обсуждение

Метод ТСТ позволяет изучать не только структурные особенности электрически активных систем, но и механизм межфазного электрического взаимодействия их компонент. Исследование динамики процесса реализации термостимулированных токов в электрически активной коллоидной системе позволяет установить природу доминирующих в ней релаксаторов, а также изучить механизм и условия разрушения дипольной поляризации и объемно-зарядового состояния этой системы [10,11].

На рис. 1 представлены спектры ТСТ венозной крови человека I–IV групп. Интенсивная релаксация термостимулированных токов в рассматриваемой конденсированной системе при отсутствии внешнего напряжения на электродах является свидетельством образования внутренней разности потенциалов между этими электродами, наличия каналов ионной проводимости в рассматриваемой ЭАКС, а также свободных носителей заряда, источником которых являются как ионы полярной матрицы, так и заряды твердой фазы. С ростом температуры системы, вследствие увеличения интенсивности теплового движения структурных элементов твердой фазы, происходит термический выход заряженных дефектов из потенциальных ловушек твердой поверхности в жидкую среду. Свободные ионы жидкой фазы и заряды твердой фазы движутся под действием внутреннего электрического поля в каналах ионной проводимости, что и обуславливает наличие термостимулированного тока. Поскольку до начала процесса активации эти носители тока являлись частью структуры твердой и жидкой фаз исследуемой коллоидной системы, динамика термостимулированных токов позволяет изучать структурные особенности всей системы в целом, а также ее отдельных компонент. Реализация термостимулированных токов в широком температурном интервале 20–220°C,

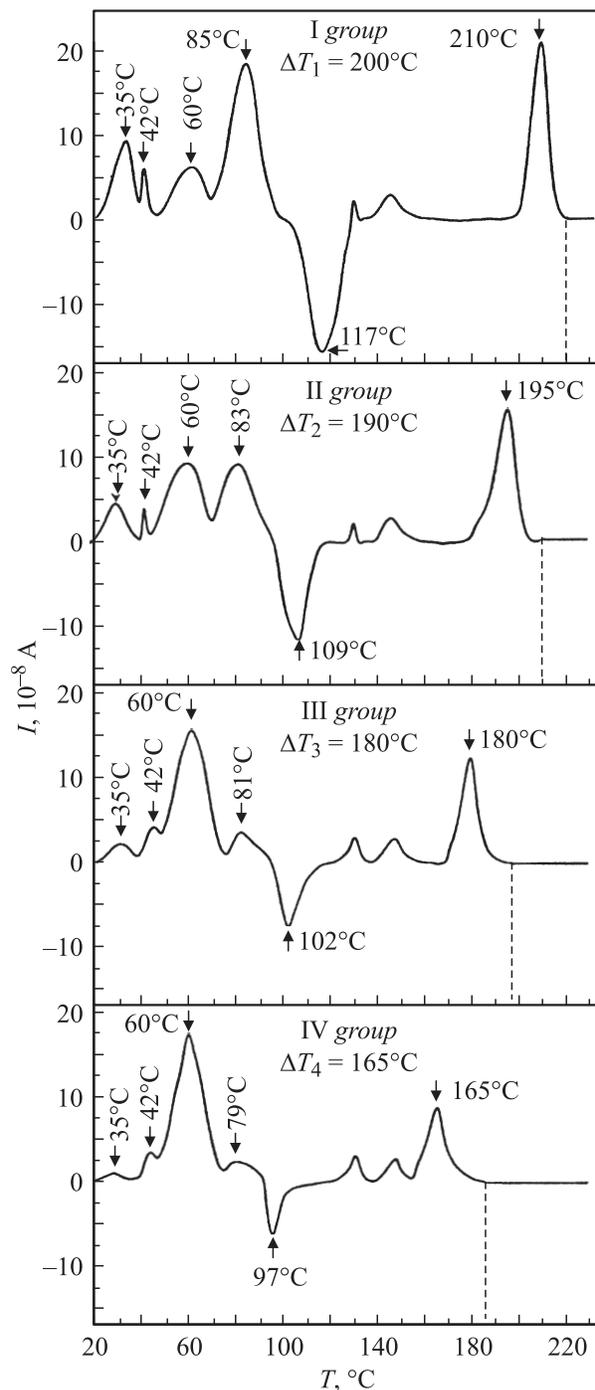


Рис. 1. Термостимулированные спектры венозной крови человека I–IV групп.

а также значительная амплитуда пиковых максимумов тока (порядка 10⁻⁷ A) обусловлены высокой концентрацией зарядов, накопленных на межфазных границах и внутри объема рассматриваемой системы, что свидетельствует о проявлении электретного эффекта в крови человека.

На основании результатов электретно-термического анализа вычисления основные электрофизические пара-

Электрофизические параметры носителей электретоного заряда в крови человека

$T_{\max}^{(n)}, \text{ }^\circ\text{C}$	Группа крови	$U_n, \text{ eV}$	$\sigma_n, \text{ C/m}^2$
35	I	0.66	0.34
	II	0.70	0.13
	III	0.73	0.05
	IV	0.75	0.03
60	I	0.48	0.31
	II	0.52	0.52
	III	0.56	0.91
	IV	0.59	1.23

метры носителей заряда (см. таблицу) с использованием методики [11,12]. Энергия активации носителей заряда U_n в окрестности температуры n -го максимума характеризует вероятность выхода заряженных дефектов из потенциальных ловушек изучаемой системы при данной температуре. Плотность термически освобожденного заряда σ_n позволяет оценить концентрацию структурных дефектов в указанных ловушках.

Энергия активации U_n определялась по температурному положению $T_{\max}^{(n)}$ и ширине ΔT_n максимума тока на спектрах ТСТ:

$$U_n = \frac{k[T_{\max}^{(n)}]^2}{\Delta T_n}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана. Плотность электретоного заряда σ_n была вычислена по площади, заключенной под кривой термотока:

$$\sigma_n = \frac{1}{\beta S} \int_{T_n^{(1)}}^{T_n^{(2)}} I(T') dT', \quad (2)$$

где $\beta = 1/\text{K/min}$ — скорость нагрева, $T_n^{(1)}$ и $T_n^{(2)}$ — нижняя и верхняя температурные границы релаксации носителей заряда n -го типа, $S = 3.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ — площадь поверхности электродов ячейки.

В спектрах ТСТ венозной крови человека (рис. 1) можно выделить две температурные области. В низкотемпературной области ($20\text{--}70^\circ\text{C}$) наличие токовых максимумов при температуре $T_1 = 35$ и $T_2 = 60^\circ\text{C}$ связывается с накоплением межфазных гетерозарядов под действием внутреннего электрического поля, а также с особенностями структуры водной компоненты, находящейся в плазме. Температурное положение этих максимумов неизменно и не зависит от группы крови. Такие токовые максимумы характерны как для органических, так и для неорганических коллоидных систем [7,8].

В области более высоких температур ($70\text{--}210^\circ\text{C}$) обнаружена серия разнополярных максимумов тока, которые в отличие от низкотемпературных проявляют зависимость от группы крови. Полагаем, что проявление этих максимумов на спектрах ТСТ изучаемой коллоидной системы связано с термическим разрушением

различных уровней структуры белков крови, индивидуальных для каждой группы. Установлено, что температурное положение и амплитуда указанных максимумов тока уменьшаются в ряду I–IV групп. Существенной особенностью структурно-зависимых максимумов тока является изменение их полярности в определенных температурных границах, что свидетельствует об изменении направления собственного электрического поля в изучаемой гетерогенной системе. Причина этого может заключаться в термическом выходе в каналы ионной проводимости заряженных дефектов твердой фазы, являющихся одним из источников образования внутреннего поля, в результате чего объемно-зарядовое состояние всей системы в целом становится неравновесным.

Рассмотрим более подробно закономерности низкотемпературной релаксации токов в коллоидной электрически активной системе крови человека. Максимум термопика при 35°C для крови I группы почти на порядок превышает аналогичный максимум для IV группы, что связывается нами с наличием значительно большей концентрации свободных гетерозарядов (ионов свободной воды), накопленных на межфазных границах и в объеме исследуемой системы. Этот факт подтверждается увеличением плотности электретоного заряда σ_1 , вычисленной по спектрам термостимулированных токов (см. таблицу). Из сказанного выше можно сделать вывод, что для I группы крови процесс накопления заряда на межфазных границах происходит более эффективно, чем в остальных группах. Источником этих зарядов являются диссоционные процессы в полярной жидкой матрице крови человека, в ходе которых молекулы воды распадаются на ионы. Следует отметить, что диссоциация молекул жидкости в окрестности температуры 35°C реализуется преимущественно под действием внутреннего электрического поля, поскольку энергии теплового движения молекул недостаточно для их ионизации. В связи с этим концентрация свободных ионов плазмы находится в прямой зависимости от концентрации молекул объемной воды.

По-видимому, увеличение амплитуды максимума тока при 35°C для крови I группы связано с наличием максимальной концентрации молекул свободной воды в данной системе. В то же время уменьшение амплитуды этого максимума для крови IV группы свидетельствует о наличии в ней минимальной концентрации объемной воды. В пользу этой гипотезы свидетельствует увеличение температурного интервала реализации термотоков для образцов крови I группы ($\Delta T_1 = 200^\circ\text{C}$) по сравнению с остальными группами: $\Delta T_2 = 190$, $\Delta T_3 = 180$, $\Delta T_4 = 165^\circ\text{C}$. Для крови IV группы температурный интервал реализации термотоков минимален, что также свидетельствует о наименьшей концентрации молекул свободной воды в крови этой группы.

Как следует из таблицы, в окрестности температуры 35°C происходит уменьшение энергии активации носителей заряда от 0.75 до 0.66 eV в ряду IV, III, II, I групп крови. Факт уменьшения энергии активации

указывает на возможность более интенсивного выхода накопленных гетерозарядов с поверхности клеточных мембран при этой температуре, что предположительно обусловлено меньшей электрической активностью мембран клеток крови I группы.

Таким образом, все вышеизложенные факты свидетельствуют от наибольшем содержании объемной воды в крови I группы.

Максимум тока, наблюдаемый на спектрах ТСТ крови человека при температуре 60°C (рис. 1), связан с переходом структурированной воды в объемное состояние, на что указывают многочисленные экспериментальные работы [7,13-16]. Установлено, что наибольшая интенсивность токового пика при этой температуре наблюдается для крови IV группы. В связи в этом полагаем, что в коллоидной системе крови человека IV группы количество воды, находящейся в связанном состоянии, является наибольшим по сравнению с другими группами. Подтверждением этого является уменьшение амплитуды пикового максимума при 35°C, а также ширины температурного интервала реализации термотоков для крови IV группы, что свидетельствует о наличии в ней наименьшей концентрации молекул свободной воды. В свою очередь, это способствует более эффективному проявлению физически неоднородных свойств связанной воды в рассматриваемой системе. Расчетные электрофизические параметры, представленные в таблице для температуры 60°, показывают, что плотность электретного заряда для образца крови IV группы максимальна и превышает этот параметр для образца крови I группы в четыре раза, что свидетельствует в пользу деструктуризации молекул воды в этом образце.

Известно [6], что эффективность кластеризации структуры полярной жидкости напрямую зависит от поверхностной активной твердой фазы, на которой находится эта жидкость. В связи с этим наиболее сильное изменение структуры жидкой фазы в крови IV группы является доказательством более высокой электрической активности клеточных мембран для этой группы. Подтверждением большей поверхностной активности мембран для IV группы крови является повышение энергии активации носителей заряда в указанной области температур от 0.48 до 0.59 eV в ряду I–IV групп (см. таблицу), что обусловлено увеличением энергии закрепления указанных зарядов за счет взаимодействия с поверхностью твердой фазы. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод, что для IV группы крови вероятность термического выхода этих зарядов является минимальной. Тем не менее увеличение амплитуды максимума тока при 60°C для крови этой группы можно объяснить наличием в ней более высокой концентрации потенциальных ловушек, содержащих термоактивационные заряды.

Таким образом, в результате проведенного электретно-термического анализа структурных свойств крови человека сделан вывод о наличии в крови I группы большего количества свободной воды, а в крови IV группы —

большого количества связанной воды. Кроме того, высказано предположение, что электрическая активность клеточных мембран возрастает в ряду I–IV групп. Для уточнения этих выводов в работе исследованы особенности диэлектрического отклика коллоидной электрически активной системы крови человека. Как известно, метод диэлектрической спектроскопии входит в группу наиболее чувствительных и точных методов излучения структуры вещества, а регистрация дисперсии диэлектрической проницаемости связывается с перестройкой структуры исследуемой системы [11,12,17].

На рис. 2 представлены частотные зависимости действительной части низкочастотной диэлектрической проницаемости ε' крови человека при комнатных условиях для различных групп. Как следует из графиков (рис. 2), диэлектрические свойства рассматриваемой гетерогенной системы зависят от группы крови. Макропараметр ε' излучаемой электрически активной системы является постоянным для каждой группы крови в интервале частот от 25 до 10^4 Hz и далее интенсивно уменьшается при более высоких частотах, что свидетельствует о наличии в системе значительной концентрации молекулярных релаксаторов. Анализ графиков на рис. 2 показывает, что частота внешнего поля, соответствующая точке перегиба на кривой $\varepsilon'(\omega)$, является максимальной для I группы ($\omega_0 = 5 \cdot 10^4$ Hz) и минимальной для IV группы ($\omega_0 = 10^4$ Hz). Согласно теории Дебая [11], частота ω_0 связана со временем релаксации молекулярных диполей соотношением $\omega_0\tau = 1$. Поэтому увеличение ω_0 для I группы крови свидетельствует об уменьшении времени релаксации молекул водной компоненты $\tau = 1/\omega_0$ и указывает на более высокую степень свободы движения

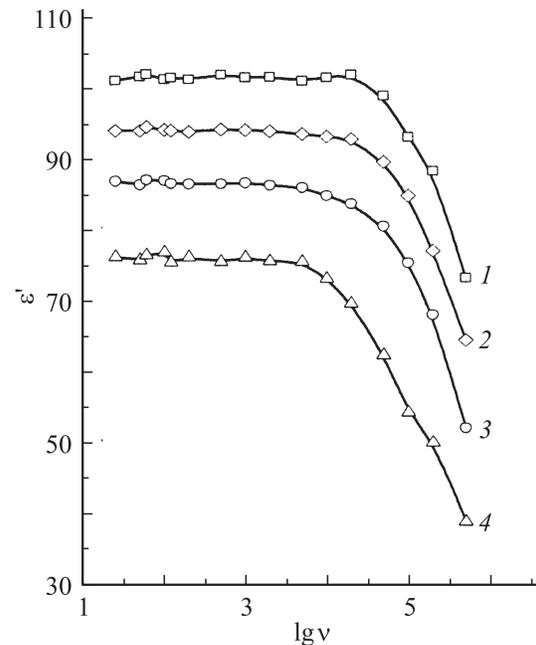


Рис. 2. Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости крови: 1 — I группа, 2 — II, 3 — III, 4 — IV.

этих молекул. В свою очередь, увеличение времени релаксации для IV группы крови можно объяснить повышением упорядоченности водных диполей и уменьшением числа степеней свободы их движения под действием внутреннего электрического поля.

Максимальное значение диэлектрической проницаемости характерно для крови I группы ($\epsilon'_1 = 105$, $\nu = 25$ Hz), а минимальное значение макропараметра ϵ' наблюдается для IV группы ($\epsilon'_{IV} = 76$, $\nu = 25$ Hz, см. рис. 2). Дисперсия низкочастотной диэлектрической поляризации для различных групп крови связывается нами с изменением структуры полярной компоненты (плазмы) под действием собственного внутреннего электрического поля. В зоне контакта электрически заряженной твердой компоненты и полярной жидкой матрицы молекулы воды жестко ориентируются внутренним полем, что приводит к уменьшению степени свободы их движения и, как следствие, к частотному вырождению низкочастотной дипольной поляризации изучаемой системы. Таким образом, изменение структуры жидкой фазы, заключающееся в упорядочении полярных молекул воды внутренним полем, приводит к уменьшению относительной диэлектрической проницаемости как жидкой компоненты крови человека, так и всей рассматриваемой системы в целом. Уменьшение диэлектрической проницаемости изучаемой коллоидной системы от 105 для крови I группы до 76 — для IV группы в интервале частот $25-10^4$ Hz, по всей вероятности, связано с увеличением степени возмущения структуры полярной жидкой матрицы в ряду I–IV групп под действием внутреннего электрического поля. Большая величина относительной диэлектрической проницаемости для I группы крови свидетельствует о том, что концентрация молекул объемной воды является наибольшей для этой группы. В то же время минимальное значение макропараметра ϵ' для IV группы объясняется наибольшей степенью кластеризации структуры жидкой фазы в этой системе. Эти факты подтверждают сделанное нами предположение о том, что электрическая активность клеточных мембран возрастает в ряду I–IV групп крови.

Полученные экспериментальные результаты позволили построить модель процессов, протекающих в ЭАКС. Особенности этой модели представлены на рис. 3. Основопологающим фактором в понимании механизма электрофизических процессов на межфазных границах ЭАКС является электрическое взаимодействие между полярными молекулами жидкой матрицы и зарядами на поверхности твердой фазы. Результатом этого взаимодействия является возникновение градиентов потенциала собственного внутреннего электрического поля. Суммарная напряженность внутреннего поля в ЭАКС содержит вклады от трех источников: заряженные дефекты поверхности твердой фазы, свободные ионы жидкой среды и полярные молекулы матрицы.

Молекулы полярной жидкости, взаимодействуя с внутренним полем, способны не только поляризоваться, но и диссоциировать на свободные ионы под действи-

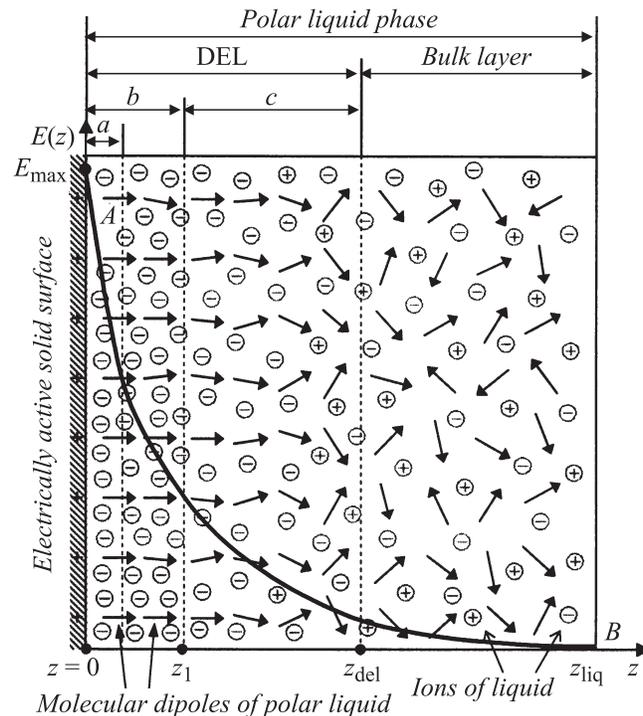


Рис. 3. Схематическое представление мезоскопической структуры полярной жидкой пленки („a“ — слой Гельмгольца, „b“ — упорядоченный слой молекул, „c“ — диффузный слой молекул). Кривая AB — изменение напряженности собственного внутреннего электрического поля $E(z)$ в объеме полярной жидкой фазы: z — расстояние до активной твердой поверхности, z_1 — толщина упорядоченного слоя жидкости, z_{del} — толщина двойного электрического слоя, z_{liq} — толщина жидкой прослойки.

ем этого поля. При низких температурах реализуется преимущественно полевая ионизация молекул жидкости, а эффект Пула–Френкеля проявляется в наибольшей степени [18,19]. Согласно теории Пула–Френкеля, электрическое поле способствует уменьшению энергии ионизации полярных молекул жидкой фазы, что приводит к повышению степени диссоциации этой жидкости и, как следствие, увеличению концентрации образующихся в ней свободных ионов n_i :

$$n_i = n \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \exp\left(\frac{\alpha\sqrt{E}}{kT}\right), \quad (3)$$

где n — постоянная Ломшмидта жидкой среды, U_0 — энергия, необходимая для диссоциации молекул в отсутствие электрического поля, E — напряженность внутреннего поля, α — постоянная, зависящая от структуры жидкости.

Вблизи заряженной поверхности твердой фазы под действием электрических сил происходит эффективное накопление ионов противоположного знака, что обуславливает формирование двойного электрического слоя (ДЭС) (рис. 3). Этот слой представляет собой

новую фазу структурообразования в исследуемой электроактивной системе и принадлежит как твердой, так и жидкой компонентам [20,21]. Таким образом, на межфазных границах электрически активных конденсированных систем под действием внутреннего поля формируется двойной электрический слой, в то время как в электрически нейтральных системах формирование ДЭС происходит только при наличии внешнего поля либо в результате неэлектрической адсорбции ионов жидкой среды поверхностью твердой фазы.

В связи с тем что противоионы жидкости находятся под действием не только внутреннего поля, но и теплового движения, наблюдается распределение этих ионов в некоторой области пространства. Вблизи поверхности твердой фазы напряженность внутреннего поля максимальна и электрическое взаимодействие ионов с внутренним полем превалирует над их тепловым движением. Поэтому противоионы, адсорбированные активной твердой поверхностью (электрическая адсорбция) и непосредственно контактирующие с ней, образуют слой Гельмгольца („a“ на рис. 3), который характеризуется наибольшей плотностью заряда. В результате экранирования зарядов этой поверхности ионами жидкой среды напряженность собственного электрического поля уменьшается при удалении от поверхности твердой фазы (кривая АВ, рис. 3). При этом формируется слой Гуи-Чепмена с диффузной структурой ионного распределения. Поскольку вне объема ДЭС напряженность внутреннего электрического поля пренебрежимо мала, значения концентрации разноименных ионов жидкой среды совпадают, а плотность объемного заряда стремится к нулю. Таким образом, в пределах ДЭС реализуются градиенты концентрации свободных ионов: плотность объемного заряда в двойном электрическом слое максимальна вблизи поверхности твердой фазы и стремится к нулю при удалении от нее.

Проникновение собственного внутреннего поля ЭАКС в глубину полярной матрицы и его взаимодействие с молекулами жидкости способно приводить к изменению ее структуры в локальных микрообластях. Вблизи электрически активной поверхности твердой фазы полярные молекулы жидкой среды жестко ориентированы внутренним полем, обладают меньшим числом степеней свободы движения и образуют упорядоченный слой ДЭС $0 < z < z_1$ („b“ на рис. 3). Диффузный, менее упорядоченный, слой жидкости $z_1 < z < z_{del}$ („c“ на рис. 3) содержит как сильно ориентированные, так и свободные молекулы двойного электрического слоя, поскольку в этой области пространства происходит значительное уменьшение напряженности внутреннего поля. Совокупность упорядоченного и диффузного слоев, являющихся частью ДЭС, представляет собой область жидкой компоненты, где присутствуют ориентированные внутренним электрическим полем молекулы жидкости. Таким образом, двойной электрический слой включает область жидкой фазы с измененной структурой, в пределах которой полярные молекулы упорядочены

под действием суммарного собственного внутреннего поля, затрудняющего их ориентационную подвижность и уменьшающего число их степеней свободы, что и приводит к наблюдаемому в эксперименте уменьшению диэлектрической поляризации. Граница ДЭС определяет расстояние в жидкой фазе z_{del} , начиная с которого внутреннее электрическое поле не способно оказывать влияние на хаотическое тепловое движение молекул жидкости, а возмущение структуры полярной матрицы становится пренебрежимо мало.

Образование мезоскопической неоднородности в локальных микрообластях полярной жидкой матрицы ЭАКС сопровождается появлением значительной дисперсии диэлектрической поляризации как жидкой среды, так и всей изучаемой системы в целом [6,22]. В связи с изложенным можно утверждать, что относительная диэлектрическая проницаемость ϵ' рассматриваемой системы непосредственно зависит от концентрации микрообластей жидкой фазы с возмущенной структурой. В связи с этим наблюдаемое в эксперименте уменьшение диэлектрической проницаемости крови человека в ряду I–IV групп подтверждает сделанный нами вывод о наиболее высокой степени кластеризации структуры полярной жидкости матрицы в крови IV группы.

На основании изложенных выше фактов можно выделить следующие отличительные свойства электрически активных конденсированных систем.

1. Наличие межфазного взаимодействия твердой и жидкой компонент, приводящего к возникновению градиентов потенциала собственного внутреннего электрического поля.
2. Формирование двойного электрического слоя и возмущение структуры полярной жидкой матрицы в его пределах под действием внутреннего поля.
3. Появление значительной дисперсии низкочастотной диэлектрической поляризации изучаемой гетерогенной системы.

Заключение

Проведен комплексный анализ ЭАКС, включающих две фазы: твердую компоненту с активной поверхностью и жидкую полярную матрицу. основополагающим фактором в понимании механизма протекающих процессов является межфазное электроконтактное взаимодействие, приводящее к возникновению градиентов потенциала собственного внутреннего электрического поля данной системы.

Собственное поле является катализатором процессов диссоциации в полярной матрице, что приводит к повышению в ней концентрации свободных ионов. В результате электрического взаимодействия ионов жидкости с заряженной поверхностью твердой фазы вблизи последней происходит эффективное накопление (электрическая адсорбция) противоионов, что является свидетельством проявления электретного эффекта.

На межфазных границах ЭАКС под действием внутреннего поля формируется двойной электрический слой, в то время как в электрически нейтральных системах формирование ДЭС происходит только при наличии внешнего поля. Внутри двойного электрического слоя в ЭАКС происходят кластеризации структуры полярной жидкой матрицы и образование в ней мезоскопической неоднородности. Это связано с жесткой фиксацией молекул воды зарядами твердой активной компоненты, что значительно уменьшает число степеней свободы движения этих молекул и, как следствие, приводит к снижению дипольной поляризации. Вне объема ДЭС влияние внутреннего поля на тепловое движение молекул полярной матрицы ослабляется и жидкая компонента характеризуется объемными свойствами. Следствием этого процесса является наблюдаемая в эксперименте дисперсия низкочастотной диэлектрической поляризации ЭАКС.

Особые свойства ЭАКС, обусловленные наличием межфазного электрического взаимодействия, находят отражение в наблюдаемой дисперсии диэлектрической поляризации крови человека. Установлена зависимость низкочастотной диэлектрической проницаемости от группы крови. Минимальное значение диэлектрической проницаемости для крови IV группы ($\sigma'_{IV} = 76$, $\nu = 25$ Hz) можно объяснить наличием высокой концентрации молекул связанной воды в данной системе, что свидетельствует о высокой электрической активности поверхности клеточных мембран крови этой группы. Диэлектрическая проницаемость крови I группы ($\epsilon'_I = 105$, $\nu = 25$ Hz) является максимальной по сравнению с остальными группами в связи с наибольшей концентрацией в ней молекул объемной воды, что, в свою очередь, связано с меньшей электрической активностью поверхности клеточных мембран для крови I группы.

В результате проведенных исследований установлена взаимосвязь между структурой и электрофизическими свойствами ЭАКС при наличии в них межфазного электрического взаимодействия. Экспериментальные данные, полученные в работе, позволяют в полной мере использовать результаты физических методов исследования в биомедицинских приложениях.

Список литературы

- [1] Линг Г. Физическая теория живой клетки: незамеченная революция. СПб.: Наука, 2009. 376 с. (*Ling G. Life at the cell and below-cell level: the hidden history of a fundamental revolution in biology. NY: Pacific Press, 2001.*)
- [2] Пинчук Л.С., Кравицов А.Г., Зотов С.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 115–118.
- [3] Pinchuk L.S., Goldade V.A., Sessler G.M. et al. // J. Med. Eng. Phys. 2002. Vol. 24. N 5. P. 361–364.
- [4] Gaur M.S., Tiwari R.K., Prashant Shukla et al. // J. Trends. Biomater. Artif. Organs. 2007. Vol. 21. N 1. P. 8–13.
- [5] Макаревич А.В., Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Электрические поля и электроактивные материалы в биологии и медицине. Гомель: ИММС НАНБ, 1998. 106 с.
- [6] Борисов В.С., Ежова Я.В., Щербаченко Л.А. и др. / ФТТ. 2008. Т. 50. Вып. 6. С. 980–985.
- [7] Щербаченко Л.А., Борисов В.С., Максимова Н.Т. и др. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 9. С. 129–137.
- [8] Борисов В.С., Марчук С.Д., Ежова Я.В. и др. // Вестн. НГУ. Сер. физ. 2008. Т. 3. Вып. 4. С. 33–39.
- [9] Карнаков В.А., Борисов В.С., Ежова Я.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 2008. Т. 51. Вып. 8. С. 57–60.
- [10] *Electrets* / Ed. by G.M. Sessler. Vol. 1. Morganhill (Ca), 1999. 431 p.
- [11] Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. 248 с.
- [12] Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
- [13] Чураев Н.В. Исследование свойств тонких слоев жидкостей. М.: МГУ, 1974. С. 84–96.
- [14] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Бултазаев А.В. // ДАН СССР. 1966. № 166. С. 639.
- [15] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Бултазаев А.В. // ЖЭТФ. 1966. № 51. С. 969.
- [16] Дерягин Б.В., Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Свойства тонких слоев воды вблизи твердых поверхностей — связанная вода в дисперсных системах. Иркутск: ИГУ, 1980. С. 4–13.
- [17] Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). М.: Гостехиздат, 1949. 500 с.
- [18] Frenkel Ya.I. // J. Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 657.
- [19] Murgatroud P.N. // J. Phys. 1970. Vol. 3. N 2. P. 151.
- [20] Делаксей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов / Под ред. А.Н. Фрумкина. М.: Мир, 1967. 351 с.
- [21] Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1983. 400 с.
- [22] Карнаков В.А., Ежова Я.В., Щербаченко Л.А. и др. // ФТТ. 2006. Т. 48. Вып. 11. С. 1946–1948.